

祁连山区不同尺寸双环入渗仪对比试验

阳勇^{1,2}, 陈仁升^{1,2}, 宋耀选^{1,2}, 郭淑海^{1,2}, 刘章文^{1,2}, 王磊^{1,2}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院黑河上游生态—水文试验研究站, 兰州 730000;

2. 中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 设计7组不同内外径的双环入渗仪, 在位于祁连山区的黑河上游平坦草地开展多次野外土壤入渗试验, 对比分析双环入渗仪内外环尺寸对土壤入渗率和饱和导水率的影响。结果表明, 双环入渗仪内径相同时, 外径越大则稳定入渗率和饱和导水率越小; 外径相同时, 内径越小则稳定入渗率和饱和导水率越小。初始入渗率与双环入渗仪尺寸关系不显著, 但稳定入渗率和饱和导水率与入渗仪缓冲指数呈显著负相关。综合考虑安装简便, 用水条件, 试验可靠等多方面因素, 推荐山区使用内径20 cm, 外径40 cm的双环入渗仪。

关键词: 双环入渗仪; 入渗率; 饱和导水率; 缓冲指数

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0328-04

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.01.054

Comparison Experimental Study on Double-ring Infiltrometers with Different Sizes in the Qilian Mountain

YANG Yong^{1,2}, CHEN Rensheng^{1,2}, SONG Yaoyuan^{1,2},

GUO Shuhai^{1,2}, LIU Zhangwen^{1,2}, WANG Lei^{1,2}

(1. Qilian Alpine Ecology and Hydrology Research Station, Northwest Institute of Eco-environment and

Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000; 2. Key Laboratory of

Ecohydrology Inland River Basin, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract: Seven groups of double-ring infiltrometers, with different inner and outer diameters, were laid out and conducted in the grassland flat field in the Heihe river upstream in Qilian mountains, to investigate effects of the size of the infiltrometers on the measurement of the infiltration process and saturated hydraulic conductivity. The results showed that if the inner diameters of double-ring infiltrometer were same, the larger the outer diameter, the smaller the stable infiltration rate and saturated hydraulic conductivity; and if the outer diameters were same, the smaller the inner diameter, the smaller the stable infiltration rate and saturated hydraulic conductivity. The stable infiltration rate and saturated hydraulic conductivity were significantly negative correlation with the buffer index of double-ring infiltrometers, but there was no clear correlation between the initial infiltration rate and the buffer index. Considering the simplicity of installation, water demand and apparatus accuracy, the double-ring infiltrometer with the diameters of 20 cm and 40 cm for the inner and outer rings was recommended to measure the soil water infiltration process and saturated hydraulic conductivity in the mountainous regions.

Keywords: double-ring infiltrometer; infiltration rate; saturated hydraulic conductivity; buffer index

土壤入渗是指雨水、积雪融水以及灌溉用水从土壤表面渗入土壤形成土壤水的过程^[1], 是大气降水或灌溉水入渗补给浅层地下水的唯一方法^[2], 其特性既是评价土壤涵养水源和抗侵蚀能力的重要指标, 也是坡面水文过程及土壤侵蚀过程模拟的重要输入参数^[3], 是探讨流域产汇流机制的基础和前提。试验测定土壤入渗过程的方法较多, 主要有人工模拟降雨

法^[4]、环刀法^[5]、双环入渗法^[6-7]、单环入渗法^[8]、圆盘入渗仪^[9]等, 其中双环入渗法是田间测定土壤入渗最常用、经典和准确的方法, 也是判断其他方法测定结果的基础^[10]。

双环入渗仪的尺寸和形状均会影响地表入渗过程测定结果。Lai等^[11]利用不同尺寸的双环入渗仪测量了石羊河下游民勤绿洲区的地表饱和导水率, 认

为内环直径在 80 cm 以上可以获得较理想的实测结果;来剑斌等^[12]设计 4 种不同内外直径的双环入渗仪,在中国科学院地理科学与资源研究所禹城综合试验站实测地表饱和导水率,对比结果显示,内径较大的入渗仪测定结果较为稳定;任宗萍等^[3]在中国科学院安塞水土保持综合试验站内,利用 5 种不同尺寸的双环入渗仪实测大豆田地地表下渗过程,结果显示饱和导水率随双环入渗仪缓冲指数增大而减小。众多研究皆显示双环尺寸能影响入渗仪实测地表下渗过程,但大量研究多集中于农田^[3]、黄土高原^[13]和沙漠地区^[14],对于试验条件相对困难的高海拔山区,其野外实地测定相对较少。祁连山区位于青藏高原西北缘,是河西走廊三大内陆河石羊河、黑河和疏勒河的发源地和涵养区,是山前绿洲人民工农业生产生活的主要水源地^[15]。本研究拟设计多种不同尺寸的双环入渗仪,在祁连山区黑河上游的平坦草地开展地表下渗过程对比试验,获取山区地表下渗率和土壤饱和导水率参数,对比分析双环尺寸对山区土壤入渗过程的影响,以期为研究区域尺度的水源涵养和水文过程提供基础数据,为祁连山区水源地的保护和可持续发展提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验区选择在位于祁连山中段黑河上游的中国科学院西北生态环境资源研究院黑河上游生态—水文试验研究站的高寒草原试验场内,地理坐标 99°53′ E, 38°16′ N,海拔 2 980 m。该区多年平均气温约为 1.5℃,其中 1 月和 7 月平均气温分别为-8.4℃和 14.5℃;多年平均降水量约为 447 mm,且 90%降水发生在植被生长期(5—9 月)。试验区土壤层厚约 70 cm,70 cm 以下为砂砾石层,最大冻结深度约为 240 cm。试验点属于基本属于高寒草原植被区,主要植被有青藏苔草(*Carex moorcroftii*)、线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)和冷蒿(*Artemisia frigida* Willd.)等。草层高度 20~30 cm,盖度约 100%,其中以苔草和嵩草为优势种群。

1.2 试验设计

在试验区平坦草地上,于 2014 年 8 月布设 7 组不同大小(分别用 DR1,DR2,DR3,DR4,DR5,DR6,DR7 表示,具体尺寸见表 1),每组 3 个共 21 个双环入渗仪。表 1 中缓冲指数 $b^{[1]}$ 定义为: $b=(R_o-R_i)/R_o$,表示试验过程中外环对减少内环入渗侧向流影响的贡献。其中, R_o 和 R_i 分别为双环入渗仪的外环和内环直径(cm),双环插入地表土壤深度为 12 cm。为防止双环入渗仪布设时破坏表层土壤进而影响测量结果,在入渗仪布设完成 1 a 后开展观测试验,并分别于 2015

年 9 月、2016 年 7 月和 8 月共进行 3 次土壤入渗试验。为保证内外环水位一致,分别利用 2 个简易马氏瓶对内外环同时进行供水,并记录时间和供水量,同时记录水温。入渗试验时环内水位始终保持为 10 cm。所有入渗仪布设在同一区域,地表为相同植被类型。每次试验时,人工修剪入渗仪内地表植被,减少植被对地表入渗过程的影响。

表 1 7 组双环入渗仪的基本参数

双环编号	DR1	DR2	DR3	DR4	DR5	DR6	DR7
内环直径/cm	15	15	20	20	25	25	30
外环直径/cm	20	30	30	40	30	40	60
缓冲指数	0.25	0.50	0.33	0.50	0.17	0.38	0.50

1.3 数据处理

由于土壤初始入渗率受土壤初始含水量影响较大^[5],且试验初始阶段的读数误差和系统误差较大,为此本文除讨论土壤初始入渗率外,还将重点讨论入渗过程稳定后的稳定入渗率。在至少 5 次相同测定时间内供水量恒定或相差不大时可视为达到稳定入渗,此时的入渗率为稳定入渗率。根据土壤入渗与温度的关系,结合实测水温,将每次测定的入渗率转化为 10℃下的入渗率,计算公式为:

$$I_s=I_t/(0.7+0.03t) \tag{1}$$

式中: I_s 和 I_t 分别为 10℃和实测温度 $t(℃)$ 下的入渗率(mm/min)。本次研究数据分析均为 10℃下的土壤地表入渗率。

土壤饱和导水率是指土壤在饱和状态下的导水速率,既是表征土壤入渗能力的重要参数,也是水文过程和水文模型研究的重要参数。土壤地表饱和导水率可通过稳定入渗率计算,计算公式为^[3,16]:

$$K_s=I_s/(\frac{H_s}{C_1L+C_2R_i}+\frac{1}{\alpha(C_1L+C_2R_i)}+1) \tag{2}$$

式中: K_s 为饱和导水率(mm/min); C_1 和 C_2 为常量,分别为 0.316π 和 0.184π ;L 为双环入土深度(cm),本次试验为 12 cm; H_s 为水头高度(cm),本次试验为 10 cm; α 为常量,选择为 0.12 cm^{-1} ^[16]。

数据处理和图表制作主要由 Excel 完成。

2 结果与分析

2.1 初始入渗率

为减少土壤异质性和仪器误差对观测结果的影响,本试验针对同一尺寸的双环入渗仪,布设 3 套进行重复试验。当 3 组试验数据差别不大,如图 1(a)中 3 个 DR1 于 2015 年 9 月 9 日所测入渗过程,选择 3 组数据平均值为该尺寸入渗仪的入渗过程。当 3 个同样尺寸入渗仪的试验数据中有 1 个与其他 2 个呈显著差异时,如图 1(b)中 3 个 DR2 于 2015 年 9 月 9 日所测入渗过程,可认为该仪器布设异常,观测数

据为异常值,选择其余 2 个实测数据差别不大的平均值代表该尺寸入渗仪的实测入渗过程。

从图 1 还可以看出,不同尺寸入渗仪测定的土壤入渗过程比较类似,即随着入渗时间增加,入渗速度迅速降低并逐渐达到稳定状态。考虑同一天(2015 年 9 月 9 日)的入渗过程,选择最开始 1 min 的入渗率为初始入渗率,对比分析不同尺寸入渗仪测定的初始入渗率。图 2 给出了 7 种不同入渗仪的初始入渗率,其中 DR1 的初始入渗率最大,为 3.25 mm/min; DR5 的初始入渗率最小,为 1.18 mm/min,7 种不同尺寸入渗仪均值为 1.84 mm/min。对比 3 组相同内径的入渗仪实测结果,发现当内径相同时,DR1 和

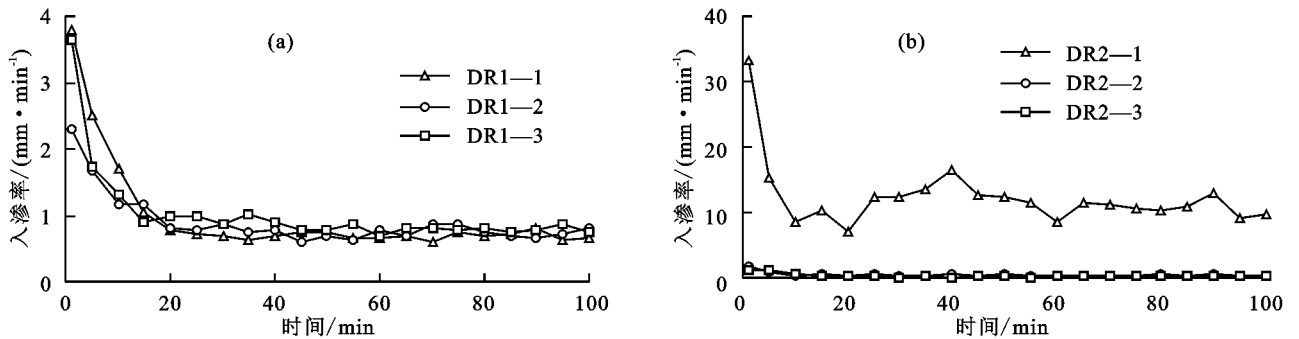


图 1 2 组入渗仪实测土壤入渗过程(2015 年 9 月 9 日)

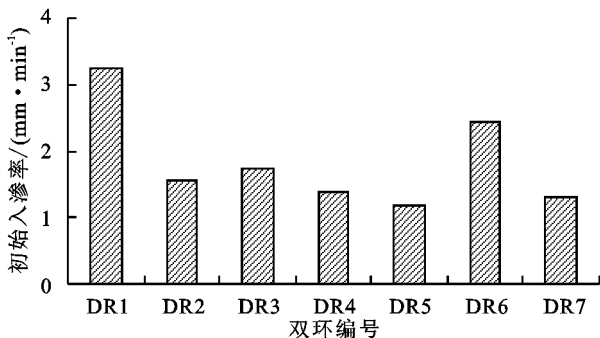


图 2 不同尺寸双环入渗仪测定初始入渗率

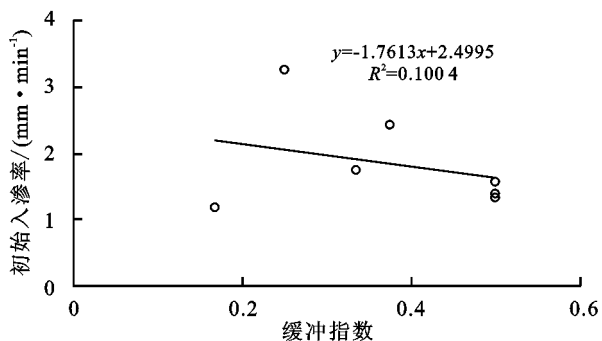


图 3 初始入渗率与双环入渗仪缓冲指数的关系

2.2 稳定入渗率

本次试验为人工试验和目视读数,极难完整捕捉到最初始入渗过程,这可能增加试验初期观测误差和系统误差;另外,土壤初始入渗率受地表前期含水量影响较大,因此本次试验测定的初始入渗率可能存在一定误差,难以确定其与入渗仪尺寸的相互关系。为此,以下将重点分析稳定入渗后的下渗率与入渗仪尺

DR2, DR3 和 DR4 这 2 组初始入渗率随外径增加而减少;但 DR5 和 DR6 这组初始入渗率随外径增加而增加。对比 2 组相同外径的入渗仪(DR2, DR3 和 DR5; DR4 和 DR6)实测结果,发现当入渗仪外径相同时,初始入渗率与内径并未呈现显著相关关系。统计不同尺寸入渗仪实测初始入渗率与缓冲指数的关系,发现两者并未呈现显著相关关系(图 3),原因可能在于初始入渗率影响因素较多,与入渗仪尺寸关系复杂,初始入渗率观测误差较大也可能影响分析结果。2016 年 7 月 12 日和 8 月 7 日的 2 次试验结果与此次试验类似,其初始入渗率也呈现较大差异,与入渗仪尺寸未呈现显著相关关系。

寸的相互关系。为减小试验误差,于 2015 年 9 月 9 日,2016 年 7 月 12 日和 8 月 7 日共进行 3 次入渗过程试验,取 3 次试验测定同一尺寸的稳定入渗率平均值代表该尺寸入渗仪的稳定入渗率。

图 4 为不同尺寸双环入渗仪在试验区的实测稳定入渗率。从图 4 可以看出,不同尺寸的双环入渗仪实测稳定入渗率存在较大差异。7 种不同尺寸双环入渗仪实测稳定入渗率大小顺序依次为 DR1, DR5, DR6, DR3, DR4, DR7 和 DR2。其中内径 15 cm, 外径 20 cm 的 DR1 实测稳定入渗率为 0.75 mm/min, 显著大于其他 6 种尺寸的试验结果(0.29~0.51 mm/min, 均值 0.39 mm/min)。以上差异说明,相对于其他尺寸入渗仪,DR1 在试验区观测入渗过程有较大误差,原因可能在于该入渗仪尺寸最小,安装时对地表土壤扰动和破坏比例最大,入土双环与土壤接触界面之间可能存在空隙,导致测定入渗速率可能快于真实的入渗过程。对比 3 组内径相同的入渗仪(DR1 和 DR2; DR3 和 DR4; DR5 和 DR6)实测结果,发现当内径相同时,入渗仪外径越大则实测稳定入渗率越小。对比 2 组外径相同的入渗仪(DR2, DR3 和 DR5; DR4 和 DR6)实测结果,发现当外径相同时,入渗仪内径越小则实测稳定入渗率越小。稳定入渗率与缓冲指数呈反比,即缓冲指数越大,双环入渗仪实测地表稳定入渗率越小;缓冲指数越小,则稳定入渗率越大。

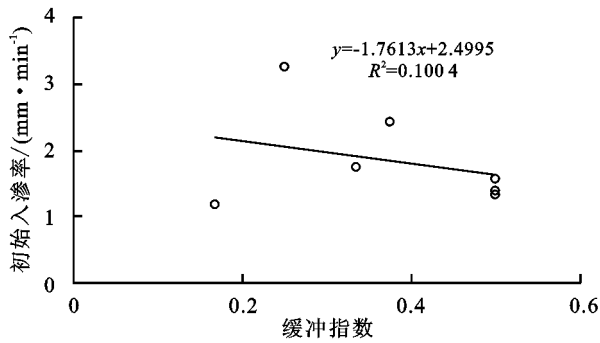


图 4 不同尺寸双环入渗仪实测稳定入渗率

2.3 饱和和导水率

当双环入渗过程达到稳定,获取稳定入渗率后,利用公式(2)可计算各种不同尺寸双环入渗仪测定的地表土壤饱和和导水率。图 5 为不同尺寸双环入渗仪对应的地表土壤饱和和导水率。从图 5 可以看出,不同尺寸的双环入渗仪测定的地表饱和和导水率存在较大差异。与稳定入渗率类似,内径 15 cm,外径 20 cm 的 DR1 实测的饱和和导水率最大,约为 0.40 mm/min。3 组内径相同的入渗仪(DR1 和 DR2; DR3 和 DR4; DR5 和 DR6)测定结果对比显示,内径相同的入渗仪外径越大则饱和和导水率越小。2 组外径相同的入渗仪(DR2, DR3 和 DR5; DR4 和 DR6)测定结果对比显示,外径相同的入渗仪内径越小则饱和和导水率越小。

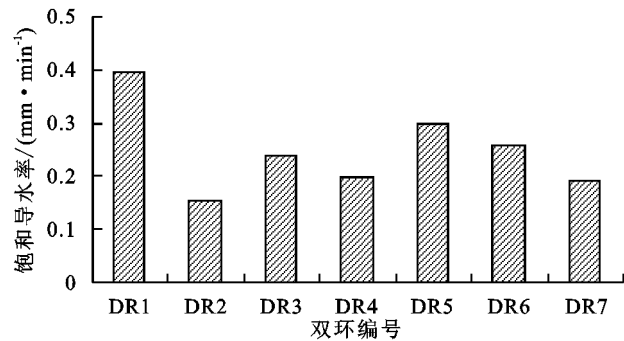


图 5 不同尺寸双环入渗仪实测土壤饱和和导水率

图 6 为饱和和导水率与缓冲指数对比关系,回归趋势分析显示饱和和导水率与缓冲指数呈反比($y = -0.50x + 0.44, R^2 = 0.68$),即缓冲指数越大,双环入渗仪实测土壤饱和和导水率越小;缓冲指数越小,则饱和和导水率越大。由于 DR1 实测饱和和导水率显著大于其他 6 个,若单独考虑其他 6 种入渗仪测定饱和和导水率和缓冲指数的关系,其负相关关系将更显著($y = -0.36x + 0.36, R^2 = 0.85$),说明侧渗对双环入渗过程存在较大影响,即外环越大,越能减小内环的侧渗,内环的下渗更能代表土壤垂直的入渗过程。

稳定入渗率和饱和和导水率的分析皆显示尺寸为 DR1 的双环入渗仪,其测定结果与其他 6 种尺寸入渗仪存在显著差异,说明该入渗仪尺寸偏小不适合祁连山区的地表入渗过程和饱和和导水率的观测。如仅

考虑其余 6 组入渗仪结果,发现不同尺寸双环入渗仪实测饱和和导水率差异不大,其区间为 0.15~0.30 mm/min,均值为 0.22 mm/min。虽然直径越大的双环入渗仪更能有效实测地表入渗过程^[11-12],但较大直径的双环入渗仪在山区安装困难,且试验操作时需要大量的水方能开展入渗试验,这些试验用水在山区运输极为困难,以上因素皆制约了大尺寸入渗仪在山区的运用。本研究结果显示,在相同缓冲指数条件下,较大尺寸的 DR7 与较小尺寸的 DR4 实测稳定入渗率和饱和和导水率差异不大,考虑到仪器的易于加工、运输和安装等野外人力物力的合理运用,推荐在运水困难的祁连山区,可使用尺寸合适的 DR4 双环入渗仪来观测山区土壤的入渗过程和饱和和导水率。

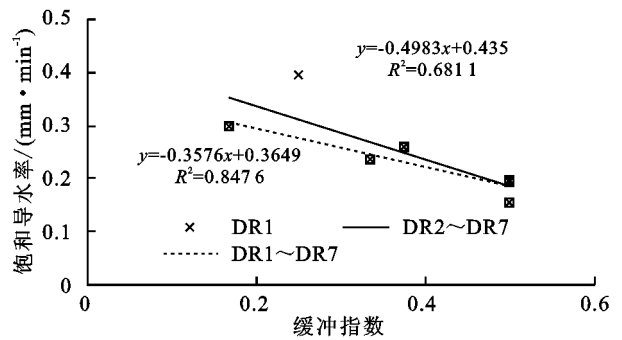


图 6 土壤饱和和导水率与双环入渗仪缓冲指数的关系

3 结论

(1)祁连山区黑河上游平坦草地的地表稳定入渗率和饱和和导水率分别为 0.39 mm/min 和 0.22 mm/min。

(2)初始入渗率与双环入渗仪尺寸关系不显著。但当入渗仪内径相同时,外径越大则稳定入渗率和饱和和导水率越小;外径相同时,内径越小则稳定入渗率和饱和和导水率越小。

(3)稳定入渗率和饱和和导水率与缓冲指数呈反比,即双环入渗仪缓冲指数越大,则稳定入渗率和饱和和导水率越小。

(4)尺寸偏小的双环入渗仪不适合山区的入渗过程试验。考虑安装简便、用水条件、试验可靠等多方面因素,推荐在祁连山区使用内径 20 cm,外径 40 cm 的双环入渗仪来研究入渗过程和土壤饱和和导水率。

参考文献:

[1] 赵维俊,刘贤德,张学龙,等. 祁连山西水林区亚高山灌丛土壤入渗性能研究[J]. 水土保持学报,2015,29(2): 106-110.
[2] 莫斌,陈晓燕,刘涛,等. 紫色土丘陵区土壤入渗及其测定方法研究[J]. 水土保持学报,2016,30(2):116-121.
[3] 任宗萍,张光辉,王兵,等. 双环直径对土壤入渗速率的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(4):94-97,103.